

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

*Výpočet zkratových proudů ve trojfázových střídavých
soustavách dle ČSN EN 60909*
*Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC
Networks by EN 60909*

Prohlášení o autorství bakalářské práce:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. 5. 2011

.....

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Zdeňkovi Medvecovi za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a své přítelkyni za podporu během doby mého studia.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá zkratovými proudy v trojfázových elektrizačních soustavách, kde v první části je uvedeno, s jakými zkratovými poruchami se můžeme setkat a jaké impedanční složky je nutné vypočítat, abychom se dopracovali přijatelných výsledků. V druhé části jsou popsány metody a pravidla pro výpočet zkratových proudů dle platné normy ČSN EN 60909. V třetí a čtvrté části jsou pak uvedeny výpočty parametrů jednotlivých prvků a příklady výpočtů zkratových proudů. V závěrečné části je uveden praktický výpočet zkratových poměrů pro VN soustavu průmyslového podniku. Výpočet je proveden metodou souměrných složek a postupného zjednodušování.

Klíčová slova:

Zkrat; napětí; proud; zkratový proud; zkratová impedance; zkratový výkon; trojfázový zkrat; transformátor; synchronní stroj; impedance; napěťový součinitel; ČSN EN 60909

Abstract:

This bachelor work deals with short-circuit currents in three-phase electric systems, where in the first part are, with which short-circuit failures we may encounter and which impedance components to be calculated, we to attain acceptable results. The second part describes the methods and rules for the calculation of short-circuit currents by valid standard ČSN EN 60909. In the third and fourth part we present calculations of the parameters of the components and examples of calculations of short-circuit currents. In the final section provides a practical calculation short-circuit ratios for VN system an industrial enterprise. The methods used for calculation are symmetrical components and sequential simplification.

Keywords:

Short-circuit; voltage; current; short-circuit current; short-circuit impedance; short-circuit power; three phase short-circuit; transformer; synchronic machine; impedance; voltage factor; ČSN EN 60909

Seznam použitých symbolů a zkratk:

A	Počáteční hodnota stejnosměrné složky
\underline{a}	Komplexní konstanta
a	Poměr mezi nesouměrným zkratovým proudem a trojfázovým zkratovým proudem
c	Napěťový součinitel
f	Kmitočet (50 Hz nebo 60 Hz)
I_b	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
I_k	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
I_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$	Stejnoseměrná složka zkratového proudu
i_p	Nárazový zkratový proud
K	Impedanční korekční součinitel
m	Činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
n	Činitel pro tepelné účinky střídavé složky
P_{krT}	Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
P_{rM}	Jmenovitý činný výkon asynchronního motoru ($P_{rM} = S_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM} \cdot \eta_{rM}$)
R	Rezistance, absolutní příp. poměrná hodnota
R_G	Rezistance synchronního stroje
R_{Gf}	Fiktivní rezistance synchronního stroje při výpočtu i_p
R_{L20}	Rezistance při teplotě 20 °C
S	Jmenovitý průřez vodiče
S_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
S_r	Jmenovitý zdánlivý výkon elektrického zařízení
T_K	Doba trvání zkratového proudu
t_{min}	Minimální doba vypnutí
t_r	Jmenovitý převod transformátoru
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(3)}$	Napětí sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
U_m	Nejvyšší napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
U_n	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
U_r	Jmenovité napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
u_{kr}	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru v procentech
u_{kR}	Napětí nakrátko reaktoru omezujícího zkrat v procentech
u_{Rr}	Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech
u_{Xr}	Induktivní složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech
X	Reaktance
X_d příp. X_q	Synchronní reaktance podélná příp. příčná
X_{dp}	Fiktivní reaktance generátoru s kompaundním buzením v případě ustáleného zkratu na svorkách (pólech)
X_d'' příp. X_q''	Rázová reaktance synchronního stroje (nasycená hodnota), podélná příp. příčná
x_d	Nenasycená synchronní reaktance, poměrná hodnota
Z	Impedance

$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(3)}$	Impedance sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
Z_k	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
η	Účinnost asynchronních motorů
κ	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
λ	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
μ	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
ρ	Rezistivita (měrný odpor)
φ	Fázový úhel
ϑ_e	teplota vodiče ve stupnicích Celsia na konci zkratu

Dolní indexy:

(1)	Sousledná složka
(2)	Zpětná složka
(0)	Netočivá složka
L_1, L_2, L_3	Vodiče trojfázové střídavé soustavy

Obsah:

1. ÚVOD	1
2. TEORETICKÝ ROZBOR ZKRATOVÝCH JEVŮ	2
2.1. DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	2
2.2. CHARAKTERISTIKA ZKRATŮ	6
2.3. ZKRATY V TROJFÁZOVÉ SOUSTAVĚ PŘI CHODU NAPRÁZDNO	6
2.4. DRUHY ZKRATŮ	7
2.4.1. <i>Souměrný zkrat</i>	7
2.4.2. <i>Nesouměrné zkraty</i>	8
2.5. PŘEHLED SLOŽKOVÝCH IMPEDANCÍ VE VZTAHU K TYPU ZKRATU	13
2.6. PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	13
2.7. ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ	14
3. METODIKA VÝPOČTU ZKRATOVÝCH POMĚRŮ DLE ČSN EN 60909	14
3.1. PŘEDPOKLADY VÝPOČTU	14
3.2. METODA VÝPOČTU	15
3.2.1. <i>Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu</i>	15
3.2.2. <i>Použití souměrných složek</i>	15
3.3. MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	17
3.4. MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	17
3.5. POSTUP VÝPOČTU	18
4. PARAMETRY PRVKŮ SOUSTAVY	18
4.1. ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	18
4.1.1. <i>Síťové napáječe</i>	19
4.1.2. <i>Transformátory</i>	19
4.1.3. <i>Venkovní vedení a kabely</i>	21
4.1.4. <i>Reaktory omezující zkratový proud</i>	22
4.1.5. <i>Synchronní stroje</i>	22
4.1.6. <i>Asynchronní motory</i>	23
5. PŘÍKLADY VÝPOČTŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ	23
5.1. POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ RÁZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_k''	24
5.1.1. <i>Trojfázový zkrat</i>	24
5.1.2. <i>Dvoufázový zkrat</i>	24
5.1.3. <i>Dvoufázový zemní zkrat</i>	24
5.1.4. <i>Jednofázový zkrat</i>	25
5.2. NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_p	25
5.2.1. <i>Trojfázový zkrat</i>	25
5.2.2. <i>Dvoufázový zkrat</i>	25
5.2.3. <i>Dvoufázový zemní zkrat</i>	26
5.2.4. <i>Jednofázový zkrat</i>	26
5.3. STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU	26
5.4. SOUMĚRNÝ VYPÍNAČÍ ZKRATOVÝ PROUD I_B	26
5.4.1. <i>Vzdálený zkrat</i>	26
5.4.2. <i>Blízký zkrat</i>	26
5.4.3. <i>Nesouměrné zkraty</i>	27
5.5. USTÁLENÝ ZKRATOVÝ PROUD I_k	27

5.6.	EKVIVALENTNÍ OTEPLOVACÍ PROUD I_{TH}	27
6.	VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PRŮMYSL OVÉHO PODNIKU	28
6.1.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R1 22kV	29
6.1.1.	Náhradní schéma:.....	29
6.1.2.	Stanovení impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu	29
6.2.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R3 22kV	35
6.2.1.	Náhradní schéma	35
6.3.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R5 6kV	36
6.3.1.	Náhradní schéma	36
6.4.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R4 6kV	37
6.4.1.	Náhradní schéma	37
6.5.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R3 6kV	38
6.5.1.	Náhradní schéma	38
6.6.	VÝPOČET V ROZVODNĚ R2 6kV	39
6.6.1.	Náhradní schéma	39
6.7.	POROVNÁNÍ ZKRATOVÝCH VÝKONŮ	40
7.	ZÁVĚR	40
	SEZNAM LITERATURY	41

1. Úvod

Zkrat patří mezi nerozšířenější poruchy v elektrizační soustavě. Vzniká poruchovým, náhodným nebo úmyslným spojením dokrátka dvou nebo tří fází a v soustavách s uzemněnou nulou také spojení jedné nebo více fází se zemí. Obvod mezi místem vzniku zkratu a napěťovým zdrojem nazýváme zkratovým obvodem. Při zkratu prochází místem vzniku zkratu mnohonásobně větší proud oproti jmenovitým hodnotám. Tento proud nazýváme nadproud. To znamená, že při zkratu je elektrickému proudu v obvodu kladen velmi malý odpor. Pakliže by odpor v obvodu byl nulový, protékal by obvodem podle Ohmova zákona nekonečně velký proud. V reálném obvodu ale bude vždy nějaký odpor, například vnitřní impedance zdrojů, vedení atd.

Působení zkratových proudů – nadproudů vzniká v místě zkratu velké teplo. Je sice krátkodobé, ale z hlediska tepelných a dynamických účinků proudů nebezpečné.

Napětí v místě zkratu klesá na nepatrnou velikost, při dokonalém zkratu téměř na nulu. Výrazný pokles napětí může negativně ovlivnit chod různých spotřebičů. Může být navíc příčinou narušení stability paralelního chodu alternátorů, což je vlastně jeden z nejnebezpečnějších následků zkratů, neboť postihuje provoz celé elektrizační soustavy.

2. Teoretický rozbor zkratových jevů

2.1. Definice základních pojmů

Zkrat (short-circuit) - náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule

Zkratový proud (short-circuit current) - je to nadproud, který vzniká v elektrické soustavě v důsledku zkratu

Předpokládaný zkratový proud (prospective (available) short-circuit current) - proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí beze změny napájení

Souměrný zkratový proud (symmetrical short-circuit current) - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' (initial symmetrical short-circuit current I_k'') - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci (*obr. 8*)

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' (initial symmetrical short-circuit power S_k'') - pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$: Pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$

POZNÁMKA: Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' se v normě ČSN EN 60909 pro výpočetní postupy nepoužívá. Pokud se S_k'' přesto použije v souvislosti se zkratovými výpočty, například pro výpočet vnitřní impedance síťového napáječe ve spojovacím bodě Q, potom se musí použít definice v následujícím tvaru: $S_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''$ nebo $Z_Q = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''$

Stejnoseměrná (aperiodická) složka $i_{d,c}$ zkratového proudu (decaying (aperiodic) component $i_{d,c}$ of short-circuit current) - střední hodnota horní a dolní obálkové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule podle *obr. 1 a 2*

Nárazový zkratový proud i_p (peak short-circuit current i_p) - maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu (*obr. 1*)

POZNÁMKA: Velikost nárazového zkratového proudu závisí na okamžiku, v němž ke zkratu došlo. Výpočet třífázového nárazového zkratového proudu i_p se aplikuje na fázový vodič a okamžik, ve kterém vznikne největší možný zkratový proud. Nesoučasné zkraty se neuvažují

Souměrný zkratový vypínací proud I_b (symmetrical short-circuit breaking current I_b) efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k (steady-state short-circuit current I_k) - efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu (*obr. 7*)

Záběrový proud I_{LR} (symmetrical locked-rotor current I_{LR}) – největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím U_{rM} při jmenovitém kmitočtu

Ekvivalentní elektrický obvod (equivalent electric circuit) – model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků (IEV 131-01-33)

Jmenovité napětí sítě U_n (nominal system voltage U_n) – sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky

Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n/\sqrt{3}$ (equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$) – napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu; jedná se o jediné aktivní napětí sítě

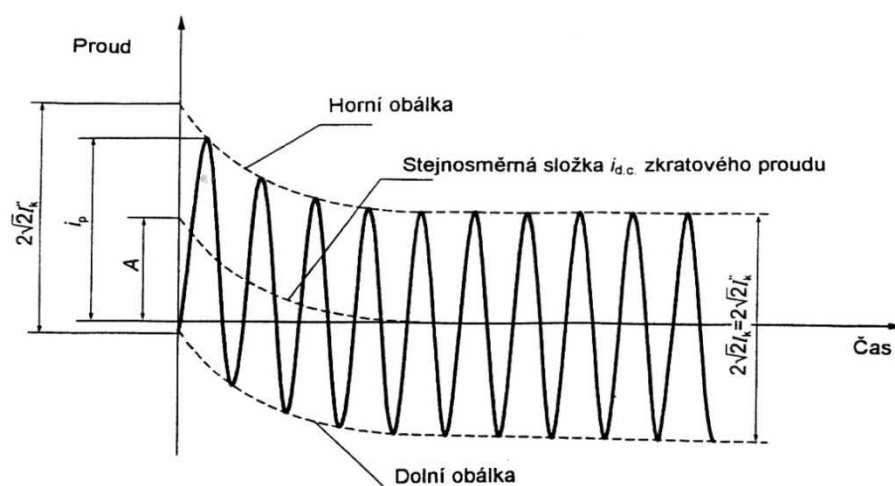
Napět'ový součinitel c (voltage factor c) – poměr mezi napětím ekvivalentního napět'ového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$ (tab. 2)

POZNÁMKA: Uvedený napět'ový součinitel c je nutný z následujících důvodů:

- kolísání napětí v závislosti na čase a místě,
- přepínání odboček transformátoru,
- zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí
- chování generátorů a motorů při přechodném ději.

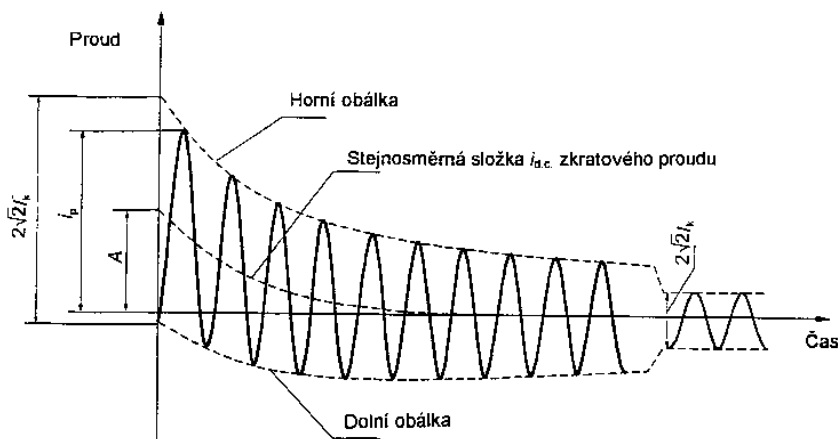
Rázové napětí synchronního stroje E'' (subtransient voltage E'' of a synchronous machine) – efektivní hodnota souměrného vnitřního napětí synchronního stroje, které působí za rázovou reaktanci X_d'' v okamžiku zkratu

Elektricky vzdálený zkrat (far-from generator short circuit) – zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní



obr. 1 Elektricky vzdálený zkrat

Elektricky blízký zkrat (near-to-generator short circuit) – zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů



obr. 2 Elektrický blízký zkrat

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy (positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ of a three-phase a.c system) – impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy (negative-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of a three-phase a.c system) – impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of a three-phase a.c system) – impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu; zahrnuje trojnásobek impedance \underline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí

Zkratová impedance \underline{Z}_k trojfázové střídavé soustavy (short-circuit impedance \underline{Z}_k of a three-phase a.c system) – zkrácené označení pro souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ pro výpočet proudů při trojfázovém zkratu

Zkratové impedance elektrického zařízení (short-circuit impedance of electrical equipment)

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení (positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ of electrical equipment) – poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí

POZNÁMKA: Index symbolu $\underline{Z}_{(1)}$ je možné vynechat, je-li vyloučena záměna se zpětnou a netočivou zkratovou impedancí.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ elektrického zařízení (negative-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of electrical equipment) – poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ elektrického zařízení (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of electrical equipment) – poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napěťového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič a/nebo zem tvoří společné zpětné vedení

Rázová reaktance X_d'' synchronního stroje (subtransient reactance X_d'' of a synchronous machine) – reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d''

POZNÁMKA: Jestliže reaktanci X_d'' v ohmech dělíme jmenovitou impedancí $Z_{rG}=U_{rG}^2/S_{rG}$ synchronního stroje, obdržíme výsledek v poměrných jednotkách, který je označen malým písmem $x_d'' = X_d'' / Z_{rG}$

Minimální doba vypnutí t_{\min} (minimum time delay t_{\min}) – nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje

POZNÁMKA: Čas t_{\min} je součtem nejkratší možné doby působení mžikové ochrany a nejkratšího vypínacího času vypínače. K nastavitelnému časovému zpoždění vypínacího zařízení se nepřihlíží.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} (thermal equivalent short-circuit current I_{th}) - efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

[1]

2.2. Charakteristika zkratů

Souměrný trojfázový zkrat působí na trojfázovou soustavu symetricky. Všechny ostatní zkraty způsobují asymetrické zatížení. A jsou to zkraty:

- jednofázové;
- dvoufázové;
- dvoufázové zemní. [2]

V těchto případech se tedy výsledné hodnoty zkratového proudu nezúčastní všechny tři fáze stejnou měrou. Proto výpočet řešíme rozkladem proudů a napětí na souměrné složky, a to souslednou, zpětnou a netočivou, dle druhu zkratu.

2.3. Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno

Uvažujeme jednoduché zapojení symetrické trojfázové soustavy s alternátorem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Impedance obvodu je složena z impedance alternátoru a impedance vnější části obvodu.

Určíme fázory napětí a proudu fází L_1, L_2, L_3 v soustavě souměrných složek:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L_1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L_2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L_3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L_1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L_2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L_3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)}\end{aligned}\quad (2)$$

Jednotkové fázory natočení jsou:

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \angle \frac{2\pi}{3} \quad (3)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \angle -\frac{2\pi}{3} \quad (4)$$

$$1 + \underline{a}^2 + \underline{a} = 0 \quad (5)$$

Souměrné složky vnitřního napětí alternátoru označíme $\underline{U}_{i(1)}, \underline{U}_{i(2)}, \underline{U}_{i(0)}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\underline{U}_{(1)}, \underline{U}_{(2)}, \underline{U}_{(0)}$ a složkové proudy $\underline{I}_{(1)}, \underline{I}_{(2)}, \underline{I}_{(0)}$.

Pak platí:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i(1)} &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ \underline{U}_{i(2)} &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{i(0)} &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (6)$$

Jelikož je alternátor vždy jen zdrojem sousledné složky napětí, potom tedy platí (při chodu naprázdno):

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i(1)} &= \underline{U}_i = \underline{U}_f \\ \underline{U}_{i(2)} &= 0 \\ \underline{U}_{i(0)} &= 0\end{aligned}\quad (7)$$

Kde \underline{U}_f je fázor napětí na svorkách alternátoru a můžeme vyjádřit základní rovnice složkových soustav:

$$\begin{aligned}\underline{U}_i &= \underline{U}_f = \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (8)$$

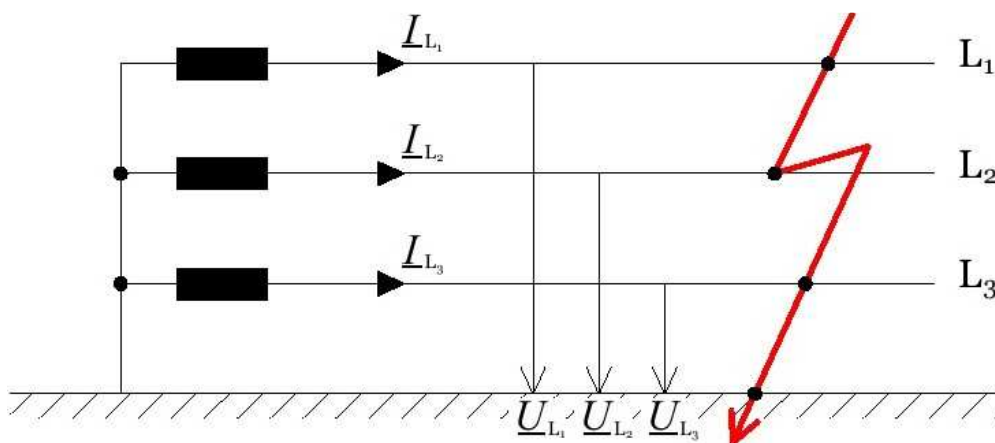
[2]

2.4. Druhy zkratů

2.4.1. Souměrný zkrat

Charakteristickým souměrným zkratem, který známe, je **zkrat trojfázový (zemní)**. Tento zkrat nastává při kovovém (vodivém) spojení všech tří fází navzájem. Všechny tři fáze jsou stejně postiženy a vedou stejný zkratový proud. Tento druh zkratu nejčastěji vzniká v kabelových sítích a vede často k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.

2.4.1.1. Trojfázový (zemní) zkrat



obr. 3 Trojfázový zemní zkrat

Pro tento typ zkratu platí podle obr. 3:

$$\underline{U}_{L_1} = \underline{U}_{L_2} = \underline{U}_{L_3} = 0 \quad (9)$$

Z toho vyplývá podle rovnice (1):

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{L_1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \\
\underline{U}_{L_2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} = 0 \\
\underline{U}_{L_3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(2)} = 0
\end{aligned} \tag{10}$$

Pakliže tyto rovnice sečteme, zjistíme, že $\underline{U}_{(0)} = 0$. Uvážení této hodnoty při odečtením druhé rovnice od první dostaneme:

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} = 0 \tag{11}$$

Po dosazení do rovnic (8) a při uvážení chodu naprázdno ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$) dostaneme:

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{(2)} = 0; \quad \underline{I}_{(0)} = 0 \tag{12}$$

a dosazením do rovnic (2) nalezneme zkratové proudy:

$$\underline{I}_{L_1} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{L_2} = \underline{a}^2 \cdot \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \quad \underline{I}_{L_3} = \underline{a} \cdot \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}} \tag{13}$$

Při trojfázovém zkratu se tedy uplatní pouze sousledná složka soustavy.

2.4.2. Nesouměrné zkraty

Můžeme zde zařadit následující typy nesouměrných zkratů:

Jednofázový zkrat

- vzniká při spojení jakékoliv jedné fáze se zemí u soustavy s uzemněným uzlem. Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení (*obr. 4*).

Dvoufázový zkrat

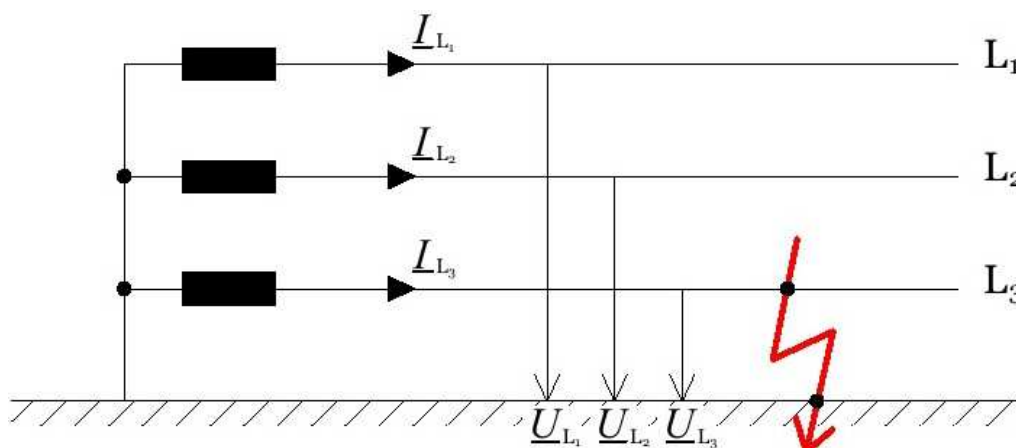
- vzniká při prostém spojení dvou různých fází v soustavách s izolovaným uzlem. (*obr. 5*).

Dvoufázový zkrat zemní

- vzniká při spojení dvou různých fází a země v soustavách s uzemněným uzlem (*obr. 6*).

[3]

2.4.2.1. Jednofázový zkrat



obr. 4 Jednofázový zkrat

Pro tento zkrat jsou základní tři rovnice:

$$\underline{U}_{L_3} = 0; \quad \underline{I}_{L_1} = \underline{I}_{L_2} = 0 \quad (14)$$

Podle rovnic (1) a (2) budou fázory napětí a proudů v místě zkratu:

$$\underline{U}_{L_3} = \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \quad (15)$$

$$\underline{I}_{L_1} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} = 0$$

$$\underline{I}_{L_2} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} = 0 \quad (16)$$

Vzájemným odečtením proudových rovnic dostaneme:

$$(\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(1)} + (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{I}_{(2)} = 0 \quad (17)$$

z toho vyplývá že $\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$.

Dosadíme-li toto do rovnice pro \underline{I}_{L_1} vyjde nám $\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$.

Po dosazení do rovnic (8) dostaneme:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (18)$$

Sečtením těchto rovnic a respektováním rovnic (16):

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}) \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (19)$$

odkud:

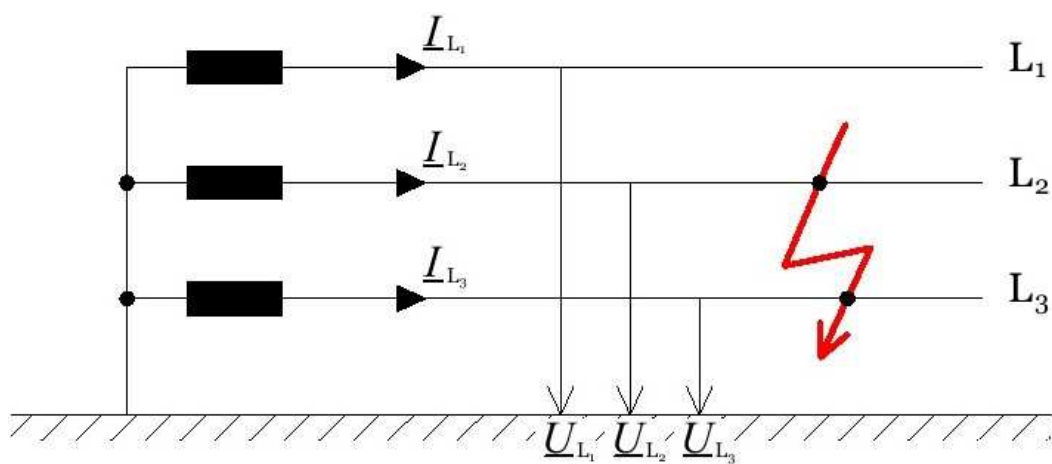
$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (20)$$

zkratový proud ve fázi L_3 bude ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$):

$$\underline{I}_{L_3} = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = \frac{3 \cdot \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (21)$$

U jednofázového zkratu je třeba určit všechny tři složkové impedance, popřípadě reaktance při zanedbání činných odporů.

2.4.2.2. Dvoufázový zkrat



obr. 5 Dvoufázový zkrat

Podle obr. 5 platí:

$$\underline{U}_{L_2} = \underline{U}_{L_3} \rightarrow \underline{U}_{L_2} - \underline{U}_{L_3} = 0 \quad (22)$$

$$\underline{I}_{L_1} = 0; \quad \underline{I}_{L_3} = -\underline{I}_{L_2} \quad (23)$$

Dosazením do rovnic (2):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L_1} = 0 &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L_2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L_3} &= -\underline{I}_{L_2} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (24)$$

Sečtením zjistíme, že $\underline{I}_{(0)} = 0$ a z první rovnice pak plyne $\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)}$.

U dvoufázového zkratu tedy neexistuje netočivá složka proudu.

Z rovnic (1) také vychází $\underline{U}_{(0)} = 0$ a dále:

$$\underline{U}_{L_2} - \underline{U}_{L_3} = 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_{(2)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \quad (25)$$

Po dosazení do rovnic (8):

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= -\underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

a odečtením dostaneme:

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}) \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (27)$$

odkud:

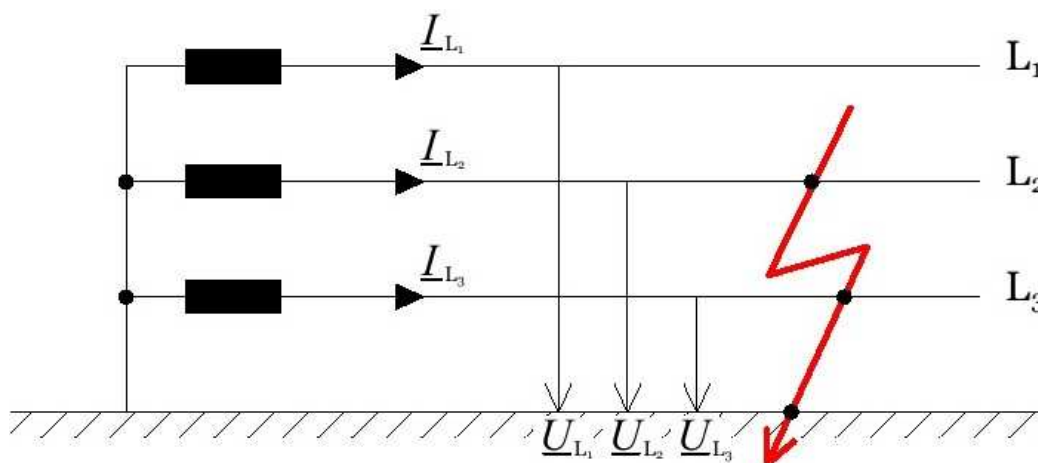
$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (28)$$

Zkratový proud např. ve fázi L_3 ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$):

$$\underline{I}_{L_3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} = (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(1)} = j \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (29)$$

Při dvoufázovém zkratu musíme zjistit souslednou a zpětnou složkovou impedanci.

2.4.2.3. Dvoufázový zkrat zemní



obr. 6 Dvoufázový zkrat zemní

Pro tento druh zkratu platí:

$$\underline{U}_{L_2} = \underline{U}_{L_3} = 0 \quad (30)$$

$$\underline{I}_{L_1} = 0 \quad (31)$$

Z rovnic (1) a (2) vyplývá:

$$\underline{I}_{L_1} = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = 0 \rightarrow \underline{I}_{(0)} = -(\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) \quad (32)$$

$$\underline{U}_{L_2} - \underline{U}_{L_3} = 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \cdot \underline{U}_{(2)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \quad (33)$$

$$\underline{U}_{L_2} = 0 = \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{(2)} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} = -\underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(0)}$$

Základní rovnice (8) pak vypadají takto:

$$\underline{U}_i = \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)}$$

$$0 = \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(0)} \quad (34)$$

$$0 = -\underline{Z}_{(0)} \cdot (\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) + \underline{U}_{(0)}$$

První rovnici násobíme $\underline{Y}_{(1)} = \underline{Z}_{(1)}^{-1};$

druhou rovnici násobíme $\underline{Y}_{(2)} = \underline{Z}_{(2)}^{-1};$

třetí rovnici násobíme $\underline{Y}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)}^{-1}$ a všechny tři sečteme:

$$\underline{Y}_{(1)} \cdot \underline{U}_i = (\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}) \cdot \underline{U}_{(0)} \quad (35)$$

odkud:
$$\underline{U}_{(0)} = \frac{\underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \quad (36)$$

jednotlivé složkové proudy z rovnic (34) po dosazení za \underline{U}_0 :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{(1)} &= \underline{Y}_{(1)} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_{(0)}) = \underline{Y}_{(1)} \cdot \frac{\underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(2)} &= -\underline{Y}_{(2)} \cdot \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(1)} \cdot \underline{Y}_{(2)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(0)} &= -\underline{Y}_{(0)} \cdot \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(0)} \cdot \underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \cdot \underline{U}_i \end{aligned} \quad (37)$$

Stanovíme hledané zkratové proudy ve fázích L_2 a L_3 užitím rovnic (2):

$$\underline{I}_{L_2} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \quad (38)$$

$$\underline{I}_{L_3} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} \quad (39)$$

Proud tekoucí zemí je součet proudů \underline{I}_{L_2} , \underline{I}_{L_3} :

$$(\underline{I}_{L_2} + \underline{I}_{L_3}) = 2 \cdot \underline{I}_{(0)} + (\underline{a}^2 + \underline{a}) \cdot \underline{I}_{(1)} + (\underline{a} + \underline{a}^2) \cdot \underline{I}_{(2)} = 2 \cdot \underline{I}_{(0)} - (\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) = 3 \cdot \underline{I}_{(0)} \quad (40)$$

U dvoufázového zkratu zemního je třeba určit všechny tři složkové impedance

2.5. Přehled složkových impedancí ve vztahu k typu zkratu

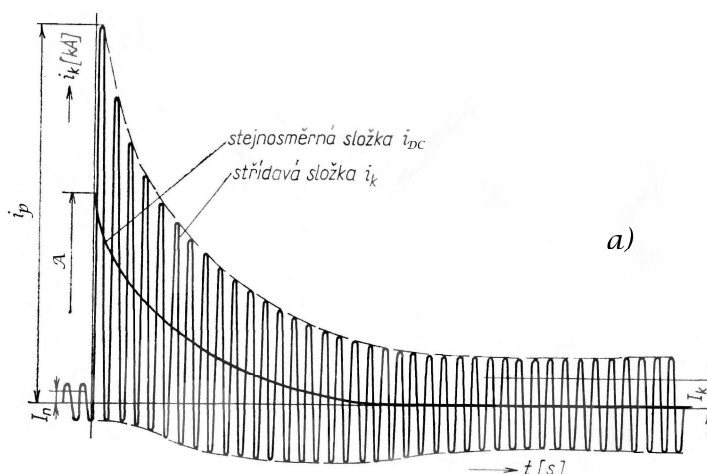
Typ zkratu	Souměrné složky impedancí
3f	$\underline{Z}_{(1)}$
1f	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$
2f	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}$
2f - zemní	$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$

tab. 1 Přehled složkových impedancí

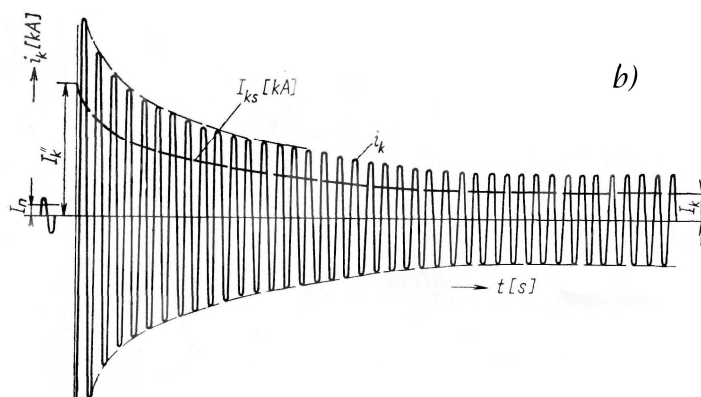
2.6. Průběh zkratového proudu

Při každém zkratu, bez ohledu na to co jej vyvolalo, se jedná o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. z normálního pracovního proudu na ustálený zkratový proud. Tento přechod není skokový, je doprovázen přechodným dějem, který trvá určitou dobu. Po tuto dobu se průběh proudu mění nejen periodicky, ale v obvodu se vyskytují také vyrovnávací proudy, které tento přechod zprostředkují. Výsledný zkratový proud se skládá ze dvou hlavních složek:

- Stejnosměrná složka;
- Střídavá složka.



obr. 7 Průběh nesouměrného zkratového proudu



obr. 8 Průběh střídavé složky zkratového proudu

2.7. Účinky zkratových proudů

Působením velkých proudů se zkraty v elektrizačních zařízeních projevují mnohými nepříznivými účinky, které ohrožují nejen bezpečnost provozu soustavy a bezpečnost zařízení, ale vážně ohrožují i bezpečnost obsluhy elektrických zařízení. Jsou vyvolány buď přímo zkratovým proudem (jsou to jeho silové, tepelné a indukční účinky), nebo poklesem napětí ve zkratovém obvodu (vliv na spotřebiče a na stabilitu rozvodné soustavy) a elektrickým obloukem, pokud jde o zkrat obloukový.

Čím je zkratový proud větší, tím jsou jeho účinky výraznější. Aby nevedly k havárii zařízení, je třeba zařízení ve zkratovém obvodu dimenzovat tak, aby těmto účinkům, zejména účinkům silovým a tepelným, bezpečně odolala.

Proto zjišťujeme velikost zkratových proudů, zejména jejich velikost za nejnepříznivějších podmínek. Musíme však uvažovat také ten druh zkratu, při kterém jsou příslušné hodnoty zkratového proudu největší. Daleko nejpočetnější jsou zkraty jednofázové. Přesto se v četných případech omezujeme na výpočet proudu při trojfázovém zkratu, protože jsou obvykle větší než při ostatních druzích zkratu.

3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909

Za základní normu, pomocí které můžeme vypočítat zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách, považujeme normu ČSN EN 60909. Ta platí pro výpočty v trojfázových střídavých soustavách NN, VN, VVN a ZVN do 550 kV, při jmenovitém kmitočtu 50 Hz nebo 60 Hz.

3.1. Předpoklady výpočtu

Pro snadnější výpočet zkratových proudů v rozsáhlých sítích se vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí;
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti;

- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory;
- Odpory oblouku se neuvažují;
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Jestliže se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, a to nejlépe na tu napěťovou hladinu, kde se má určit zkratový proud. [1]

3.2. Metoda výpočtu

3.2.1. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Je to metoda založená na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny ostatní síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny svou vnitřní impedancí.

Tato metoda se použije ve všech případech k určení zkratového proudu v místě zkratu F. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů, atd. jsou postradatelné; odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem. [1]

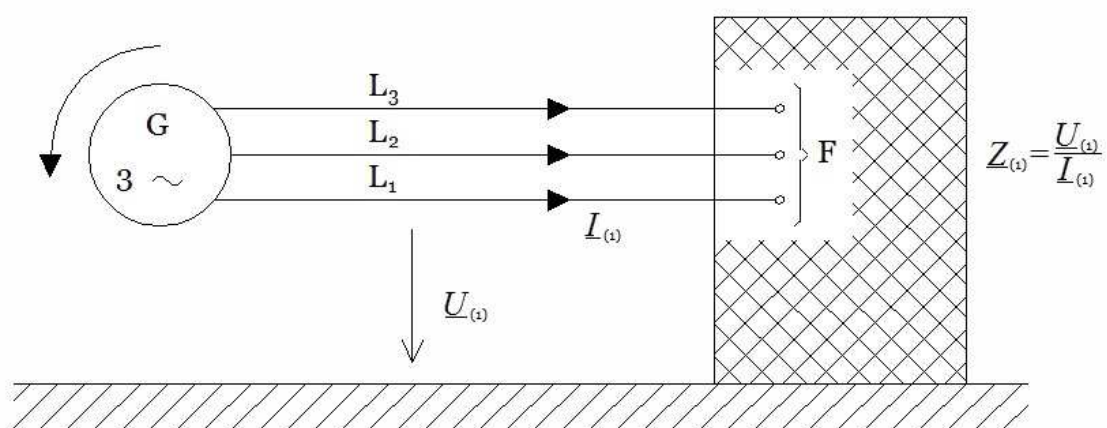
3.2.2. Použití souměrných složek

Pro souměrné a nesouměrné zkraty je vhodné počítat zkratové proudy pomocí metody souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení.

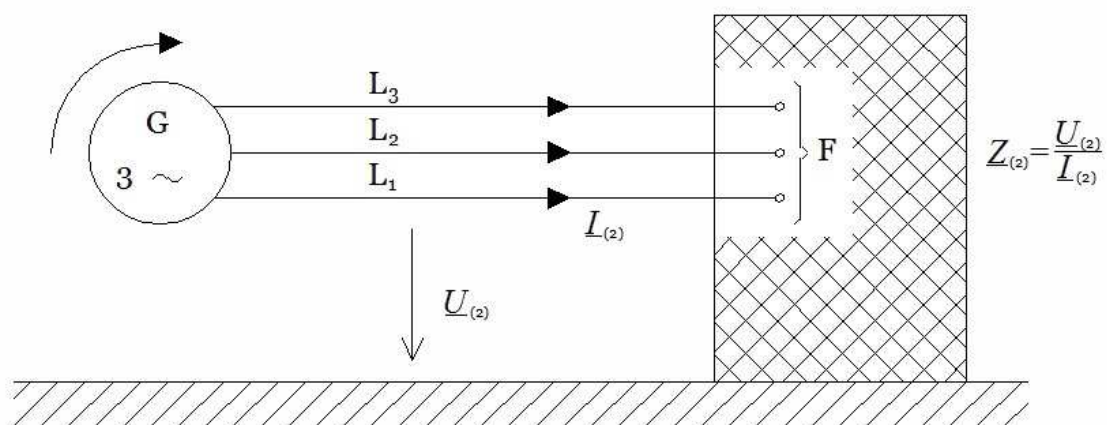
Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$;
- proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$;
- proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$.

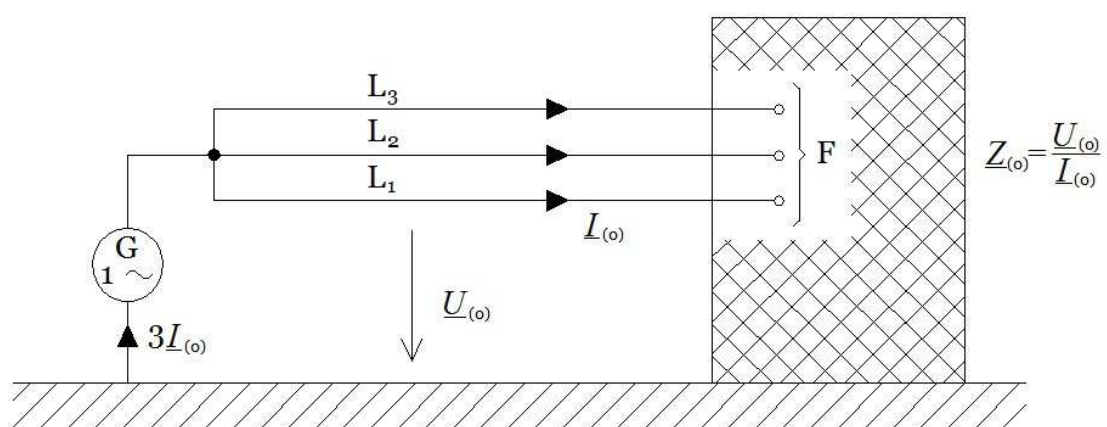
Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci. Složkové impedance prvků se určí při napájení jednotlivých prvků zdroji se souslednou (obr. 9), zpětnou (obr. 10) a netočivou (obr. 11) soustavou napětí.



obr. 9 Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$ [1]



obr. 10 Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$ [1]



obr. 11 Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$ [1]

Je nutné rozeznávat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancí každého elektrického zařízení.

Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů v soustavách VN, VVN a ZVN s použitím ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu se musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení pro soustavy s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněné soustavy a soustavy s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4.

3.3. Maximální zkratové proudy

Zkratové proudy zjišťujeme buď pro volbu a dimenzování elektrického zařízení na jejich účinky, nebo pro volbu a nastavení ochran ve zkratovém obvodu.

Pro volbu a dimenzování elektrických zařízení určujeme největší možné hodnoty zkratového proudu. Určují se za těchto předpokladů:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} podle tab. 2;
- zapojení soustavy (provozně přípustné) takové, které v místě zkratu dává největší zkratové proudy;
- pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů;
- chod motorů;
- při uvažování rezistancí R_L venkovních vedení a kabelů je jejich teplota 20 °C.

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů c_{\max}	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ¹⁾ 1,10 ²⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí > 35 kV		
¹⁾ pro soustavy NN s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V		
²⁾ pro soustavy NN s tolerancí +10 %		

tab. 2 Napěťový součinitel c

3.4. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\min} dle tab.2;

- zapojení soustavy pro zajištění jen minimálních odběrů (při paralelním spojení transformátorů a vedení se uvažuje jeden transformátor, popř. vedení odpojené);
- do zkratu pracuje snížený počet zdrojů naprázdno se jmenovitým napětím;
- vliv motorů se neuvažuje;
- při uvažování rezistancí R_L se uvažuje teplota venkovních vedení 80 °C a teplota kabelových vedení maximální přípustná.

3.5. *Postup výpočtu*

Při výpočtu zkratových proudů je nutný určitý postup, při kterém se v uvedeném sledu provedou základní kroky:

- sestavení schématu zapojení se všemi parametry prvků, vyznačení místa zkratu, druhu, případně maximální dobu trvání zkratu;
- stanovení impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu;
- sestavení náhradního schématu soustavy (*souměrný zkrat – náhradní schéma jen pro souslednou složku, nesouměrný zkrat – náhradní schéma i pro zpětnou a netočivou složku*), postupné zjednodušení, určení výsledné impedance zkratového obvodu;
- výpočet zkratových poměrů.

4. Parametry prvků soustavy

4.1. *Zkratové impedance elektrických zařízení*

Zkratové impedance, tím rozumíme souslednou $\underline{Z}_{(1)}$, zpětnou $\underline{Z}_{(2)}$ a netočivou složku $\underline{Z}_{(0)}$.

Například u tlumivek (reaktory), které slouží k omezení zkratových proudů, jsou si tyto tři složky rovny ($\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(0)}$).

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných elektrických zařízení se sousledná složka se zpětnou rovnají ($\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$).

Netočivou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(0)}$ určujeme ze střídavého napětí mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (uzemnění). V tom případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_S .

4.1.1. Síťové napáječe

Pakliže je trojfázový zkrat napájen ze sítě, kde je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' v bodě připojení Q , pak ekvivalentní sousledná složka zkratové impedance Z_Q síťového napáječe je:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (41)$$

Je-li trojfázový zkrat napájen transformátorem ze sítě VN, VVN nebo ZVN, kde je znám pouze počáteční rázový zkratový proud I_{kQ}'' v bodě připojení Q , pak ekvivalentní sousledná složka zkratové impedance Z_{Qt} vztažená ke straně transformátoru s nižším napětím je:

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (42)$$

kde: U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení Q ;

I_{kQ}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení Q ;

c napěťový součinitel (viz tab. 2);

t_r jmenovitý převod transformátoru, kdy je přepínač odboček v základní poloze.

Pokud se jedná o napáječe se jmenovitým napětím nad 35 kV napájené z venkovních vedení, je možné ekvivalentní impedanci \underline{Z}_Q považovat za reaktanci, lze tedy napsat $\underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$. V případech, kdy neznáme přesnou hodnotu rezistance R_Q , můžeme dosadit $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$, kde $X_Q = 0,995 \cdot Z_Q$.

4.1.2. Transformátory

4.1.2.1. Dvouvinuťové transformátory

Souslednou složku zkratové impedance dvouvinuťového transformátoru $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ lze vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (43)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (44)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (45)$$

kde: U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru;

P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru;

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech;

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Potřebné údaje lze nalézt na štítku stroje, případně je lze získat u výrobce.

Poměr R_T / X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. Při výpočtu velikosti zkratového proudu u velkých transformátorů je možné zanedbat činný odpor a uvažovat pouze reaktanci transformátoru. Ovšem při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p nebo stejnosměrné složky $i_{d.c.}$ je nutné činný odpor uvažovat.

U dvouvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí navíc k vypočteným impedancím zavést korekční součinitel K_T :

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (46)$$

kde: $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ je poměrná reaktance transformátoru;

c_{\max} je napěťový součinitel (viz tab. 2).

Korekční součinitel K_T se musí použít také u zpětných a netočivých složek impedancí transformátoru.

4.1.2.2. Trojvinutové transformátory

V případě trojvinutových transformátorů lze souslednou složku zkratové impedance \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C podle obr. 12 vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztahených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (47)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (48)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (49)$$

pomocí vzorců:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (50)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (51)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (52)$$

kde: U_{rTA} je jmenovité napětí transformátoru na straně A;

S_{rTAB} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami A a B;

S_{rTAC} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami A a C;

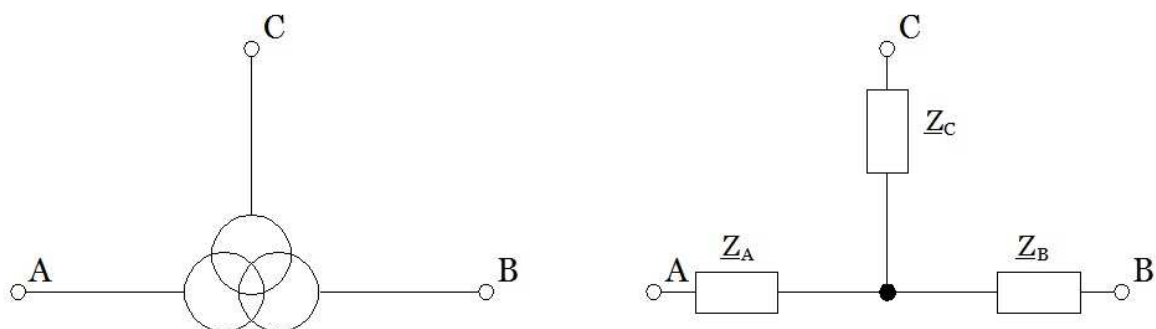
S_{rTBC} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami B a C;

u_{RrAB}, u_{XrAB} činná a induktivní složka napětí nakrátko v procentech mezi stranami A a B;

u_{RrAC}, u_{XrAC} činná a induktivní složka napětí nakrátko v procentech mezi stranami A a C;

u_{RrBC}, u_{XrBC} činná a induktivní složka napětí nakrátko v procentech mezi stranami B a C.

Netočivou složku zkratových impedancí udávají výrobci.



obr. 12 Trojvinutový transformátor

Korekční součinitel K_T se musí vypočítat pro každou impedanci zvlášť a to obdobným způsobem, jako u dvouvinutových transformátorů:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (53)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (54)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (55)$$

Musí se použít také u zpětných a netočivých složek impedancí transformátoru.

4.1.3. Venkovní vedení a kabely

Sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů.

Netočivé zkratové impedance je možné získat měřením nebo výpočtem pomocí poměrů $R_{(0)L} / R_L$ a $X_{(0)L} / X_L$.

Impedance $\underline{Z}_{(1)L}$ a $\underline{Z}_{(0)L}$ kabelů NN a VN závisejí na pracovních postupech a normách jednotlivých států a lze je převzít z příruček nebo údajů od výrobce.

Činný odpor vedení:

$$R_L = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (56)$$

Reaktance venkovních vedení:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad (57)$$

kde: ρ je měrný odpor vodiče (např. měď $\rho = \frac{1}{57} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$);

l délka vodiče v metrech;

S jmenovitý průřez vodiče v mm^2 ;

d_s střední vzdálenost mezi vodiči $d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}$;

r poloměr jednoduchého vodiče. V případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_e = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$ kde R je poloměr svazku a n je počet svazků.

4.1.4. Reaktory omezující zkratový proud

Považují se za součást zkratové impedance. Sousedné, zpětné a netočivé impedance si jsou rovny za předpokladu geometrické souměrnosti.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad \text{a } R_R \ll X_R \quad (58)$$

kde: u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku;
 U_n je jmenovité napětí soustavy.

4.1.5. Synchronní stroje

4.1.5.1. Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů, například v průmyslových sítích nebo NN sítích, je třeba použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (59)$$

s korekčním součinitelem:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (60)$$

kde: c_{\max} je napěťový součinitel (viz tab. 2);

U_{rG} jmenovité napětí generátoru;

\underline{Z}_{GK} korigovaná impedance generátoru;

\underline{Z}_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě;

φ_{rG} fázový úhel mezi I_{rG} a $U_{rG}/\sqrt{3}$;

x_d'' poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = X_d'' / Z_{rG} \quad \text{kde } Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$$

S dostatečnou přesností lze použít následující hodnoty pro fiktivní rezistance R_{Gf} :

$R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1$ kV a $S_{rG} \geq 100$ MVA

$R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1$ kV a $S_{rG} < 100$ MVA

$R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d''$ pro generátory s $U_{rG} \leq 1$ kV

Tyto hodnoty se ale nemohou použít při výpočtu aperiodické složky $i_{d.c.}$ zkratového proudu. V tomto případě se musí použít pro R_G hodnoty výrobce.

4.1.5.2. Synchronní kompenzátory a motory

Pokud se počítá počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' , nárazový zkratový proud i_p , souměrný zkratový vypínací proud I_b a ustálený zkratový proud I_k , jsou synchronní kompenzátory modelovány stejným způsobem jako synchronní generátory.

Pokud mají synchronní motory napěťovou regulaci, jsou uvažovány jako synchronní generátory. Když nemají regulaci, je potřeba použít zvláštní postupy.

4.1.6. Asynchronní motory

Do výpočtů maximálního zkratového proudu je nutné zahrnout příspěvky asynchronních motorů VN. Příspěvky motorů NN se musí zahrnout do výpočtů ve vlastní spotřebě elektráren a v průmyslových a podobných rozvodech.

Příspěvek asynchronních motorů v NN soustavě ke zkratovému proudu I_k'' se může zanedbat, pokud je tento příspěvek menší než 5 % počátečního zkratového proudu I_{kM}'' , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

$$\Sigma I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (61)$$

kde: ΣI_{rM} je součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo (bez transformátorů) k síti, kde se vyskytl zkrat;

I_{kM}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů.

Impedance motorů v sousledné a zpětné složkové soustavě se vypočítá následovně:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (62)$$

kde: U_{rM} je jmenovité napětí motoru;

I_{rM} jmenovitý proud motoru;

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru ($S_{rM} = P_{rM} / (\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM})$);

I_{LR} / I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Netočivé impedance soustavy motorů udává výrobce.

5. Příklady výpočtů zkratových proudů

V případě vzdáleného zkratu se zkratový proud počítá jako součet dvou složek:

- střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu;
- stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající směrem k nule (viz *obr. 1*).

V případě blízkého zkratu se zkratový proud počítá jako součet dvou složek:

- střídavé složky se zmenšující se amplitudou během zkratu;
- stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající směrem k nule (viz *obr. 2*).

5.1. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Je to efektivní hodnota předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu.

Pro případ, kdy je $\underline{Z}_{(0)}$ větší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, se vyskytne největší počáteční zkratový proud u trojfázového zkratu. Ale v případě, kdy je zkrat blízko transformátorů a $\underline{Z}_{(0)}$ je menší než $\underline{Z}_{(1)}$, se největší počáteční zkratový proud vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

5.1.1. Trojfázový zkrat

Počítá se z napětí ekvivalentního napěťového zdroje $(c \cdot U_n / \sqrt{3})$ v místě zkratu a zkratové impedance

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k.$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (63)$$

5.1.2. Dvoufázový zkrat

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (64)$$

V počátečním období zkratu je zpětná a sousledná impedance přibližně stejná, i když se jedná o blízký nebo vzdálený zkrat. Z toho vyplývá takto zjednodušená rovnice pro výpočet dvoufázového zkratu.

5.1.3. Dvoufázový zemní zkrat

V tomto případě je nutné rozlišit proudy fází I_{k2EL2}'', I_{k2EL3}'' a zpětného vedení I_{kE2E}'' .

$$\underline{I}_{k2EL2}'' = -j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (65)$$

$$\underline{I}_{k2EL3}'' = -j \cdot c \cdot U_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (66)$$

$$\underline{I}_{kE2E}'' = -\frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (67)$$

V případě vzdáleného zkratu s $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$:

$$I_{k2EL2}'' = c \cdot U_n \cdot \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - \underline{a}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (68)$$

$$I_{k2EL3}'' = c \cdot U_n \cdot \frac{|\underline{Z}_{(0)} / \underline{Z}_{(1)} - \underline{a}^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (69)$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (70)$$

5.1.4. Jednofázový zkrat

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (71)$$

V případě vzdáleného zkratu se $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (72)$$

Pokud je $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, potom je I_{k1}'' větší než I_k'' , ale zároveň menší než I_{kE2E}'' .

5.2. Nárazový zkratový proud i_p

Je definován jako maximální okamžitá hodnota zkratového proudu při největší stejnosměrné složce a určuje velikost namáhání všech částí zkratového obvodu elektrodynamickými silami.

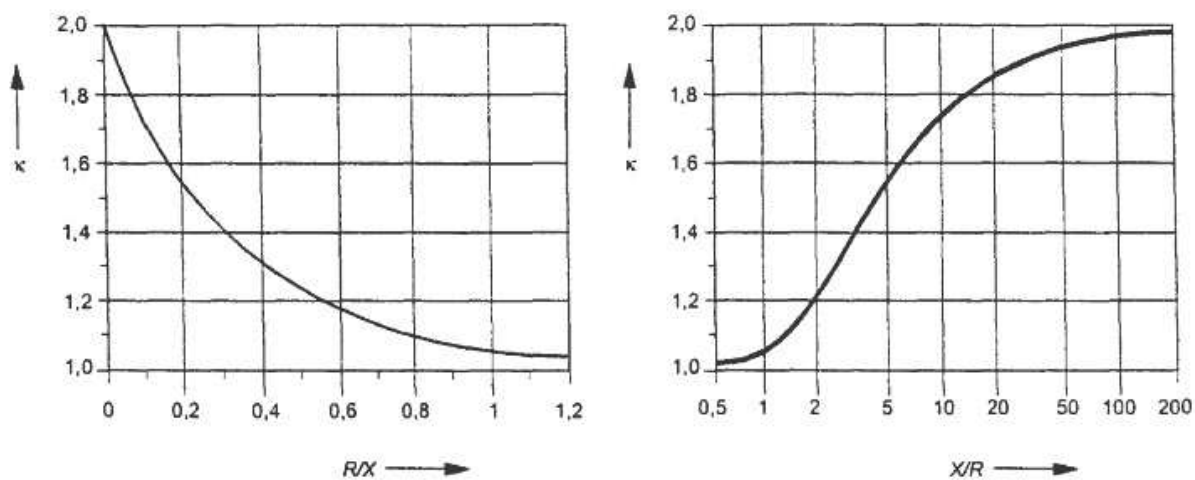
Hodnota nárazového zkratového proudu závisí na impedanci zkratového obvodu.

5.2.1. Trojfázový zkrat

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (73)$$

kde: κ je součinitel nárazového zkratového proudu a lze jej vypočítat, případně určit z obr. 13:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} \quad (74)$$



obr. 13 Součinitel κ jako funkce poměru R/X nebo X/R [1]

5.2.2. Dvofázový zkrat

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (75)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejné hodnoty κ jako pro trojfázový zkrat.

5.2.3. Dvofázový zemní zkrat

$$i_{p2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}'' \quad (76)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejné hodnoty κ jako pro trojfázový zkrat, ale v případě, kdy je $\underline{Z}_{(0)}$ mnohem menší než $\underline{Z}_{(1)}$, je nutné počítat i_{p2E} .

5.2.4. Jednofázový zkrat

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \quad (77)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejné hodnoty κ jako pro trojfázový zkrat.

5.3. Stejnosemnná složka zkratového proudu

Stejnosemnná složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu (*obr. 1* a *obr. 2*) lze vypočítat:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t \cdot R/X} \quad (78)$$

kde: I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;

f jmenovitý kmitočet;

t čas;

R/X poměr dle *obr. 13*.

5.4. Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Vypínací zkratový proud v místě zkratu se skládá ze symetrického zkratového proudu I_b a stejnosemnné složky $i_{d.c.}$ v čase t_{min} .

5.4.1. Vzdálený zkrat

U vzdálených zkratů jsou zkratové souměrné vypínací proudy rovny počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I_k'' \quad (79)$$

$$I_{b2} = I_{k2}'' \quad (80)$$

$$I_{b2E} = I_{k2E}'' \quad (81)$$

$$I_{b1} = I_{k1}'' \quad (82)$$

[1]

5.4.2. Blízký zkrat

V případě jednoduchého trojfázového zkratu se zavádí součinitel μ , který zmenšuje souměrný zkratový vypínací proud. Součinitel μ představuje poměr efektivní hodnoty celkového vypínacího zkratového proudu a efektivní hodnoty subtransitního proudu.

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (83)$$

Součinitel μ je závislý na minimální době vypnutí zkratu t_{min} a poměru I_{kG}'' / I_{rG} .

kde: I_{rG} je jmenovitý proud generátoru.

Součinitel μ pro různé doby vypnutí:

$$\mu = 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}} \quad \text{pro } t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (84)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,3 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}} \quad \text{pro } t_{\min} = 0,05 \text{ s} \quad (85)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}} \quad \text{pro } t_{\min} = 0,10 \text{ s} \quad (86)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}} \quad \text{pro } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (87)$$

V případě, kdy je poměr I_{kG}'' / I_{rG} menší než 2, můžeme počítat se součinitelem $\mu = 1$, a to pro všechny hodnoty minimální doby vypnutí t_{\min} .

5.4.3. Nesouměrné zkraty

Při nesouměrných zkratových proudech se nebere v úvahu pokles magnetického toku v generátoru a použijí se rovnice stejné jako pro vzdálené zkraty.

5.5. Ustálený zkratový proud I_k

Pro zkraty počítané jako zkraty elektricky vzdálené lze psát:

$$I_k = I_k'' \quad (88)$$

Pro výpočet maximálního ustáleného zkratového proudu u elektricky blízkého zkratu můžeme počítat se vzorcem:

$$I_{k \max} = \lambda_{\max} \cdot I_{rG} \quad (89)$$

kde: λ_{\max} je součinitel (blíže specifikován v ČSN EN 60909-0)

5.6. Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} lze stanovit použitím součinitele k_e :

$$I_{th} = I_k'' \cdot k_e \quad (90)$$

kde: k_e je součinitel pro orientační stanovení ekvivalentního oteplovacího proudu.

$$k_e = \sqrt{1 + \frac{T_{str}}{t_k}} \quad (91)$$

$$T_{str} = T_a = \frac{X}{314 \cdot R} \quad (92)$$

Pro přesnější určení ekvivalentního oteplovacího proudu použijeme vztah:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (93)$$

kde: m je součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu;
 n součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu;
 t_k doba trvání zkratu.

[3]

6. Výpočet zkratových poměrů průmyslového podniku

Při výpočtu maximálních zkratových poměrů pro VN soustavu průmyslového podniku byl uvažován následující provozní stav:

- paralelní spolupráce transformátorů T201 a T202 (spojka přípojníc v R5 6 kV sepnuta)
- v provozu všechny motory

Maximální zkratový výkon v rozvodně ČEZ 22 kV byl uvažován 245 MVA.

Posouzení zkratové odolnosti rozvodů VN

Rozvodná zařízení se dimenzují na zkratový výkon při trojfázovém zkratu, volený z řady jmenovitých výkonů S_{kn} .

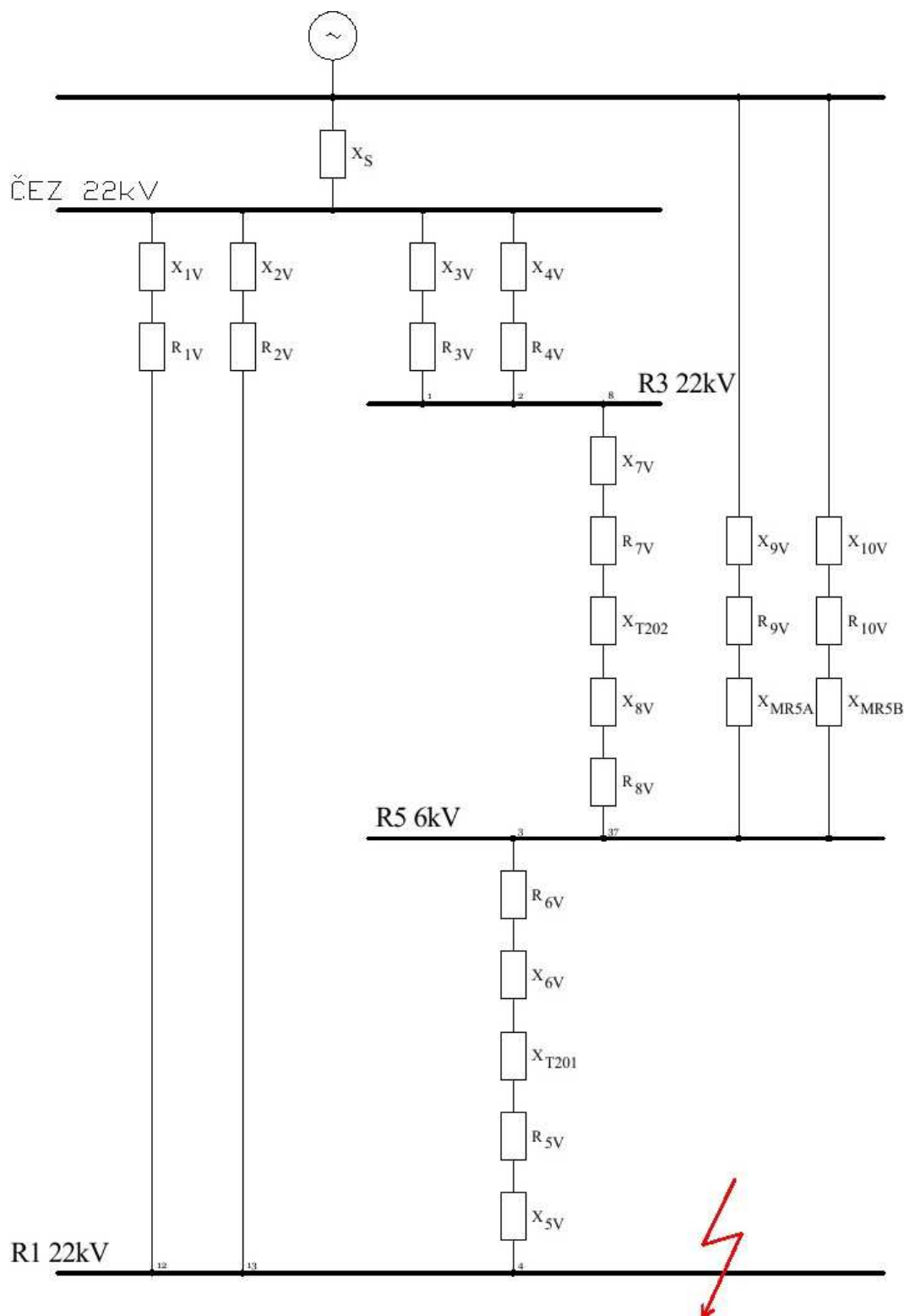
Rozvodna	Jmenovitý výkon S_{kn} [MVA]
R1 22 kV	400
R3 22 kV	400
R2 6 kV	200
R3 6 kV	200
R4 6 kV	350
R5 6 kV	350

tab. 3 Jmenovité výkony S_{kn} v rozvodnách

Schéma zadání je uvedeno v **příloze A**.

6.1. Výpočet v rozvodně R1 22kV

6.1.1. Náhradní schéma:



obr. 14 Náhradní schéma zkratového obvodu R1 22 kV

6.1.2. Stanovení impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu

Zvolen vztažný výkon $S_v = 245 \text{ MVA}$, vztažné napětí $U_v = 22 \text{ kV}$

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 245}{245} = 1,1 \Omega$$

Vedení:

$$X_{1V} = X_k \cdot l_1 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,22 \cdot \frac{245}{22^2} = 9,8 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{1V} = R_k \cdot l_1 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,22 \cdot \frac{245}{22^2} = 14,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{2V} = X_k \cdot l_2 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,22 \cdot \frac{245}{22^2} = 9,8 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{2V} = R_k \cdot l_2 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,22 \cdot \frac{245}{22^2} = 14,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{3V} = X_k \cdot l_3 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,51 \cdot \frac{245}{22^2} = 22,7 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{3V} = R_k \cdot l_3 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,51 \cdot \frac{245}{22^2} = 33,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{4V} = X_k \cdot l_4 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,51 \cdot \frac{245}{22^2} = 22,7 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{4V} = R_k \cdot l_4 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,51 \cdot \frac{245}{22^2} = 33,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{7V} = X_k \cdot l_7 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{245}{22^2} = 24,5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{7V} = R_k \cdot l_7 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,55 \cdot \frac{245}{22^2} = 35,9 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{8V} = X_k \cdot l_8 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{245}{6^2} = 63,7 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{8V} = R_k \cdot l_8 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,125 \cdot 0,12 \cdot \frac{245}{6^2} = 102,08 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{6V} = X_k \cdot l_6 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 1,7 \cdot \frac{245}{6^2} = 902,41 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{6V} = R_k \cdot l_6 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,125 \cdot 1,7 \cdot \frac{245}{6^2} = 1,446 \Omega$$

$$X_{5V} = X_k \cdot l_5 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,7 \cdot \frac{245}{22^2} = 31,18 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{5V} = R_k \cdot l_5 \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,129 \cdot 0,7 \cdot \frac{245}{22^2} = 45,709 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{9V} = X_k \cdot l_9 \cdot \frac{S_v}{2 \cdot U_s^2} = 0,078 \cdot 0,08 \cdot \frac{245}{2 \cdot 6^2} = 21,23 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{9V} = R_k \cdot l_9 \cdot \frac{S_v}{2 \cdot U_s^2} = 0,125 \cdot 0,08 \cdot \frac{245}{2 \cdot 6^2} = 34,03 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{10V} = X_k \cdot l_{10} \cdot \frac{S_v}{2 \cdot U_s^2} = 0,08 \cdot 0,2 \cdot \frac{245}{2 \cdot 6^2} = 54,4 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{10V} = R_k \cdot l_{10} \cdot \frac{S_v}{2 \cdot U_s^2} = 0,125 \cdot 0,2 \cdot \frac{245}{2 \cdot 6^2} = 85,07 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Transformátory:

$$X_{T202} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{245}{10} = 1,7885 \Omega$$

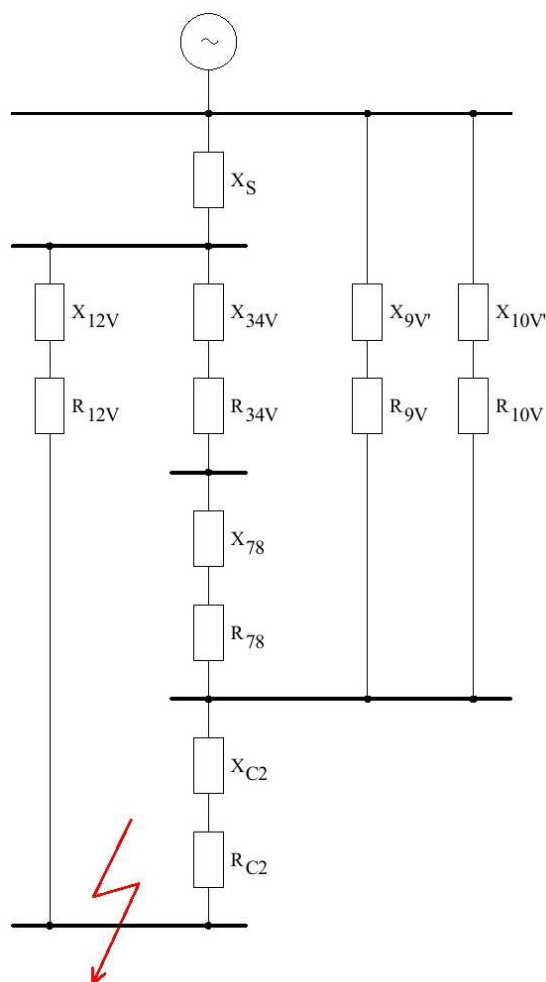
$$X_{T201} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T201}} = \frac{7,33}{100} \cdot \frac{245}{10} = 1,79585 \Omega$$

Motory:

$$X_{M5A} = \frac{x_d}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{M5A}} = \frac{16}{100} \cdot \frac{245}{4,4} = 8,91 \Omega$$

$$X_{M5B} = \frac{x_d}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{M5B}} = \frac{15}{100} \cdot \frac{245}{4,2} = 8,75 \Omega$$

Postupné zjednodušování:



obr. 15 Postupné zjednodušování zkratového obvodu R1 22 kV

$$X_{12V} = \frac{X_{1V} \cdot X_{2V}}{X_{1V} + X_{2V}} = \frac{9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}}{9,8 \cdot 10^{-3} + 9,8 \cdot 10^{-3}} = 4,9 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{12V} = \frac{R_{1V} \cdot R_{2V}}{R_{1V} + R_{2V}} = \frac{14,3 \cdot 10^{-3} \cdot 14,3 \cdot 10^{-3}}{14,3 \cdot 10^{-3} + 14,3 \cdot 10^{-3}} = 7,183 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{34V} = \frac{X_{3V} \cdot X_{4V}}{X_{3V} + X_{4V}} = \frac{22,72 \cdot 10^{-3} \cdot 22,72 \cdot 10^{-3}}{22,72 \cdot 10^{-3} + 22,72 \cdot 10^{-3}} = 11,36 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{34V} = \frac{R_{3V} \cdot R_{4V}}{R_{3V} + R_{4V}} = \frac{33,3 \cdot 10^{-3} \cdot 33,3 \cdot 10^{-3}}{33,3 \cdot 10^{-3} + 33,3 \cdot 10^{-3}} = 16,65 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{78} = X_{7V} + X_{T202} + X_{8V} = 1,8767 \Omega$$

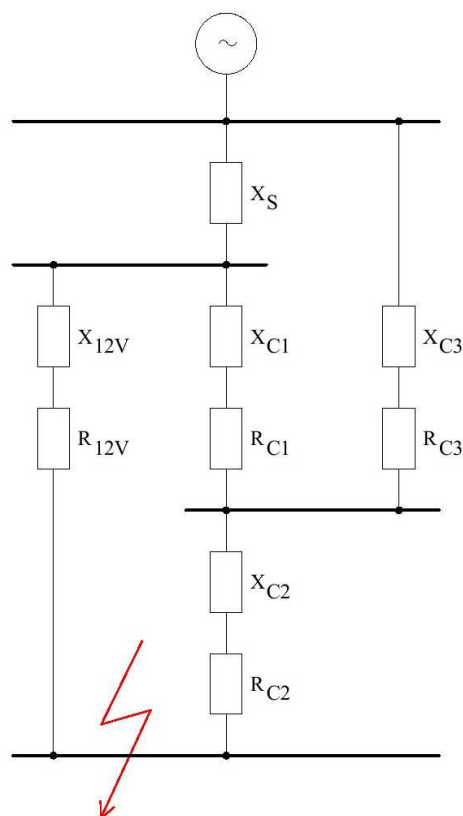
$$R_{78} = R_{7V} + R_{8V} = 0,138 \Omega$$

$$X_{C2} = X_{6V} + X_{T201} + X_{5V} = 2,729 \Omega$$

$$R_{C2} = R_{6V} + R_{5V} = 1,4919 \Omega$$

$$X_{9V'} = X_{9V} + X_{MR5A} = 8,93 \Omega$$

$$X_{10V'} = X_{10V} + X_{MR5B} = 8,804 \Omega$$



obr. 16 Postupné zjednodušování zkratového obvodu R1 22 kV

$$X_{C1} = X_{34V} + X_{78} = 1,888 \Omega$$

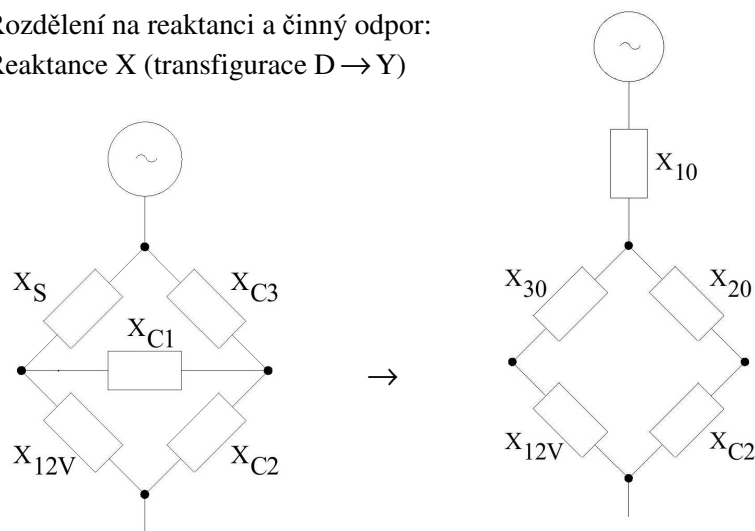
$$R_{C1} = R_{34V} + R_{78} = 0,1546 \Omega$$

$$X_{C3} = \frac{X_{9V'} \cdot X_{10V'}}{X_{9V'} + X_{10V'}} = \frac{8,93 \cdot 8,804}{8,93 + 8,804} = 4,4335 \Omega$$

$$R_{C3} = \frac{R_{9V} \cdot R_{10V}}{R_{9V} + R_{10V}} = \frac{34,03 \cdot 10^{-3} \cdot 85,07 \cdot 10^{-3}}{34,03 \cdot 10^{-3} + 85,07 \cdot 10^{-3}} = 24,3 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Rozdělení na reaktanci a činný odpor:

Reaktance X (transfigurace D → Y)

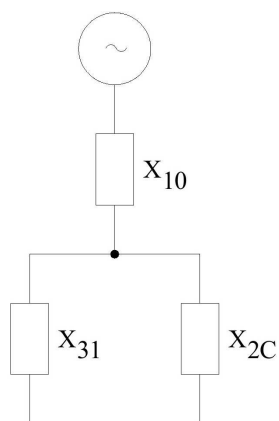


obr. 17 Transfigurace D → Y

$$X_{10} = \frac{X_S \cdot X_{C3}}{X_S + X_{C3} + X_{C1}} = \frac{1,1 \cdot 4,4335}{1,1 + 4,4335 + 1,888} = 0,657 \Omega$$

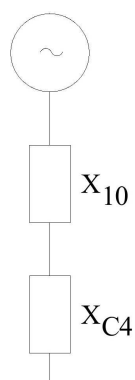
$$X_{20} = \frac{X_{C3} \cdot X_{C1}}{X_S + X_{C3} + X_{C1}} = \frac{4,4335 \cdot 1,888}{1,1 + 4,4335 + 1,888} = 1,128 \Omega$$

$$X_{30} = \frac{X_S \cdot X_{C1}}{X_S + X_{C3} + X_{C1}} = \frac{1,1 \cdot 1,888}{1,1 + 4,4335 + 1,888} = 0,2798 \Omega$$

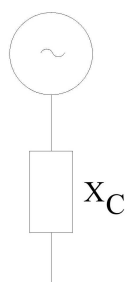


$$X_{31} = X_{30} + X_{12V} = 0,2847 \Omega$$

$$X_{2C} = X_{20} + X_{C2} = 3,857 \Omega$$



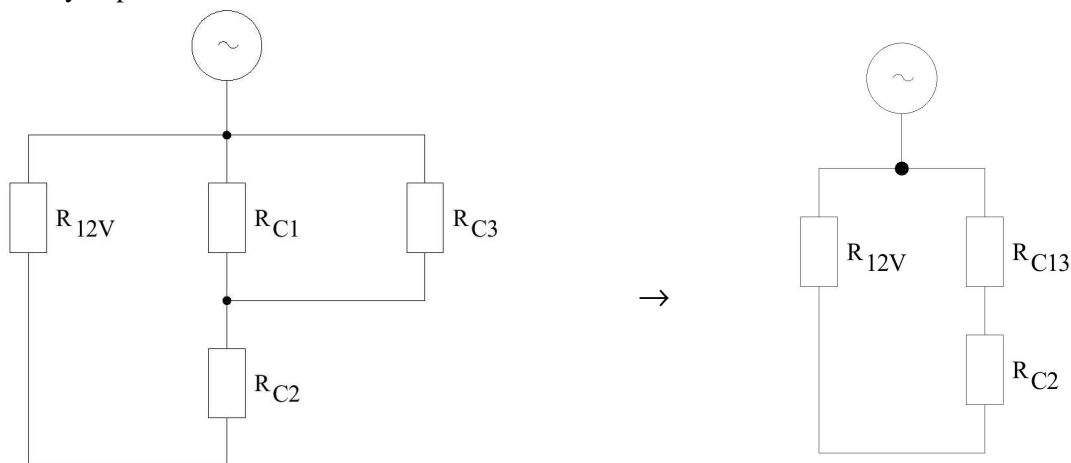
$$X_{C4} = \frac{X_{31} \cdot X_{2C}}{X_{31} + X_{2C}} = \frac{0,2847 \cdot 3,857}{0,2847 + 3,857} = 0,265 \Omega$$



$$X_C = X_{10} + X_{C4} = 0,265 + 0,657 = 0,9223 \Omega$$

obr. 18 Výsledná reaktance X_c

Činný odpor R



obr. 19 Zjednodušení obvodu

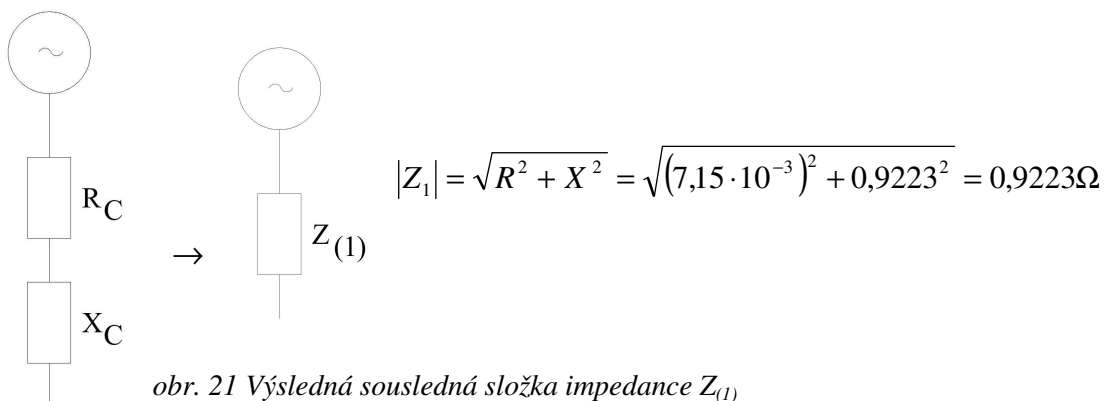
$$R_{C13} = \frac{R_{C1} \cdot R_{C3}}{R_{C1} + R_{C3}} = \frac{154,65 \cdot 10^{-3} \cdot 24,3 \cdot 10^{-3}}{154,65 \cdot 10^{-3} + 24,3 \cdot 10^{-3}} = 21 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{C5} = R_{C13} + R_{C2} = 21 \cdot 10^{-3} + 1,4919 = 1,513 \Omega$$

$$R_C = \frac{R_{12V} \cdot R_{C5}}{R_{12V} + R_{C5}} = \frac{7,183 \cdot 10^{-3} \cdot 1,513}{7,183 \cdot 10^{-3} + 1,513} = 7,15 \cdot 10^{-3} \Omega$$

obr. 20 Výsledný činný odpor R_c

Sousledná složka impedance:



obr. 21 Výsledná sousledná složka impedance $Z_{(1)}$

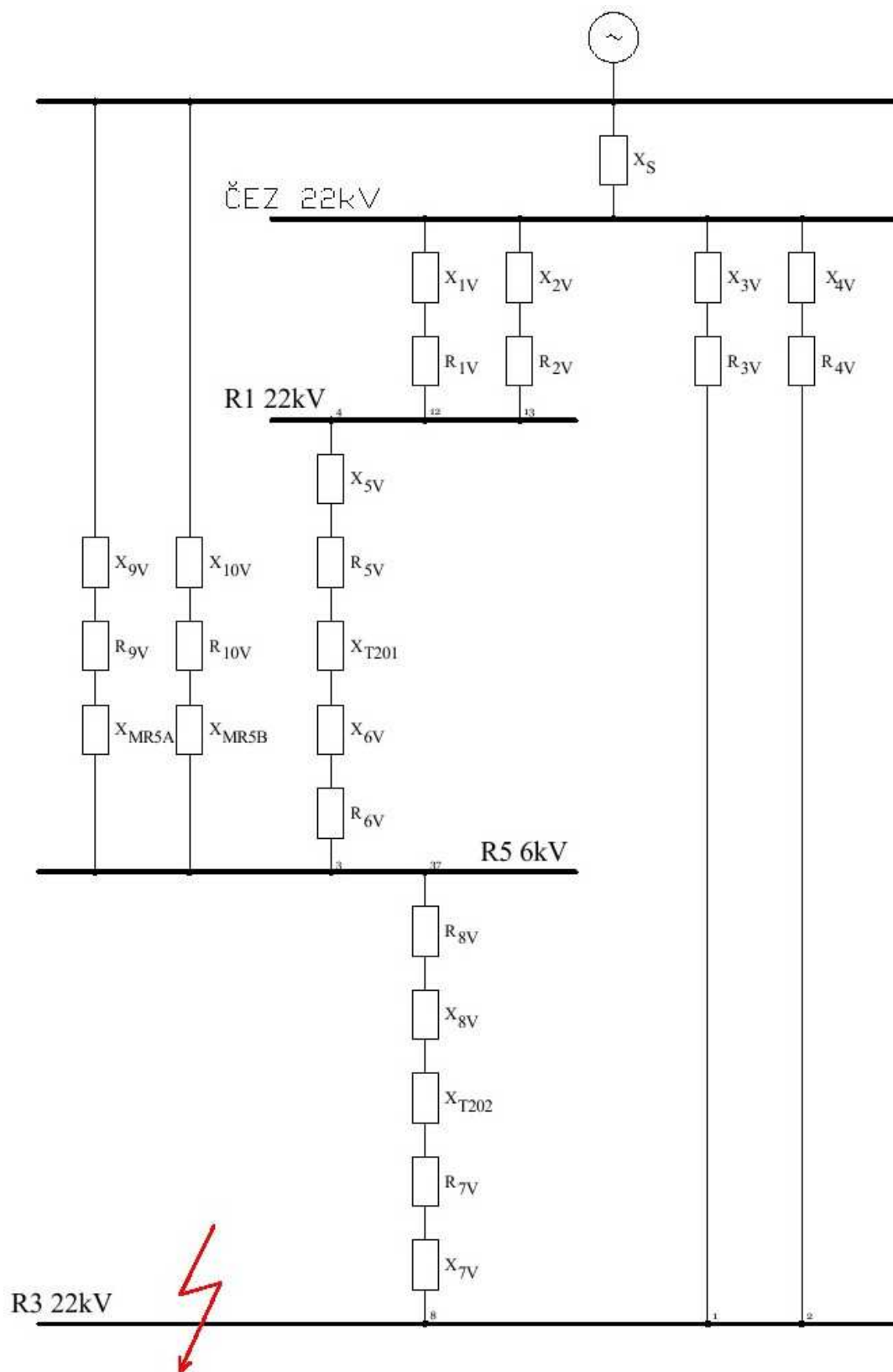
Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z_1|} = \frac{1,1 \cdot 245}{0,9223} = 292,2 \text{ MVA}$$

Zkratový výkon v rozvodně R1 22 kV je tedy $S_k = 292,2 \text{ MVA}$.

6.2. Výpočet v rozvodně R3 22kV

6.2.1. Náhradní schéma

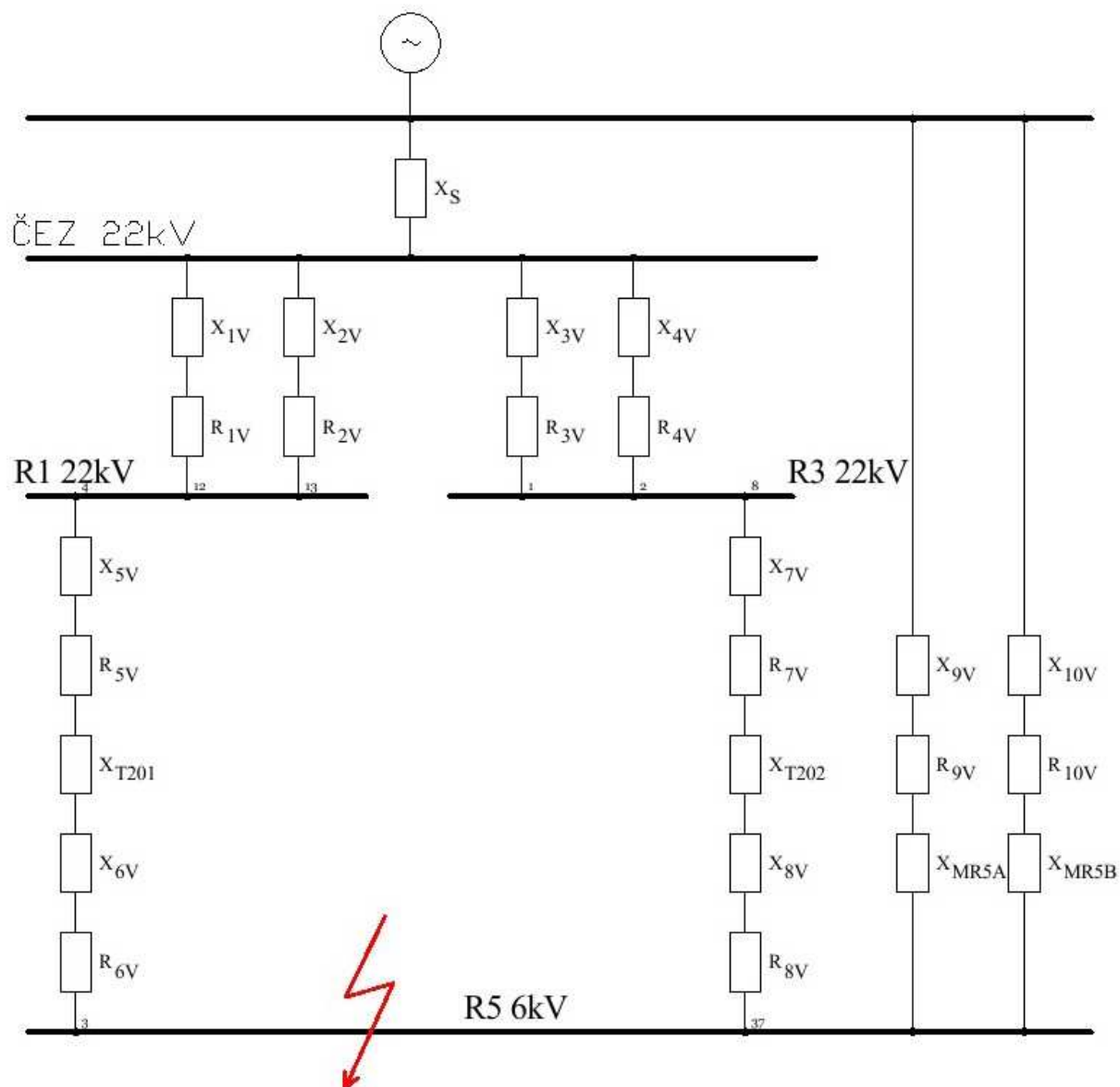


obr. 22 Náhradní schéma zkratového obvodu R3 22 kV

Po obdobném výpočtu jsem se dopracoval k hodnotě zkratového výkonu $S_k = 290,64 \text{ MVA}$.

6.3. Výpočet v rozvodně R5 6kV

6.3.1. Náhradní schéma

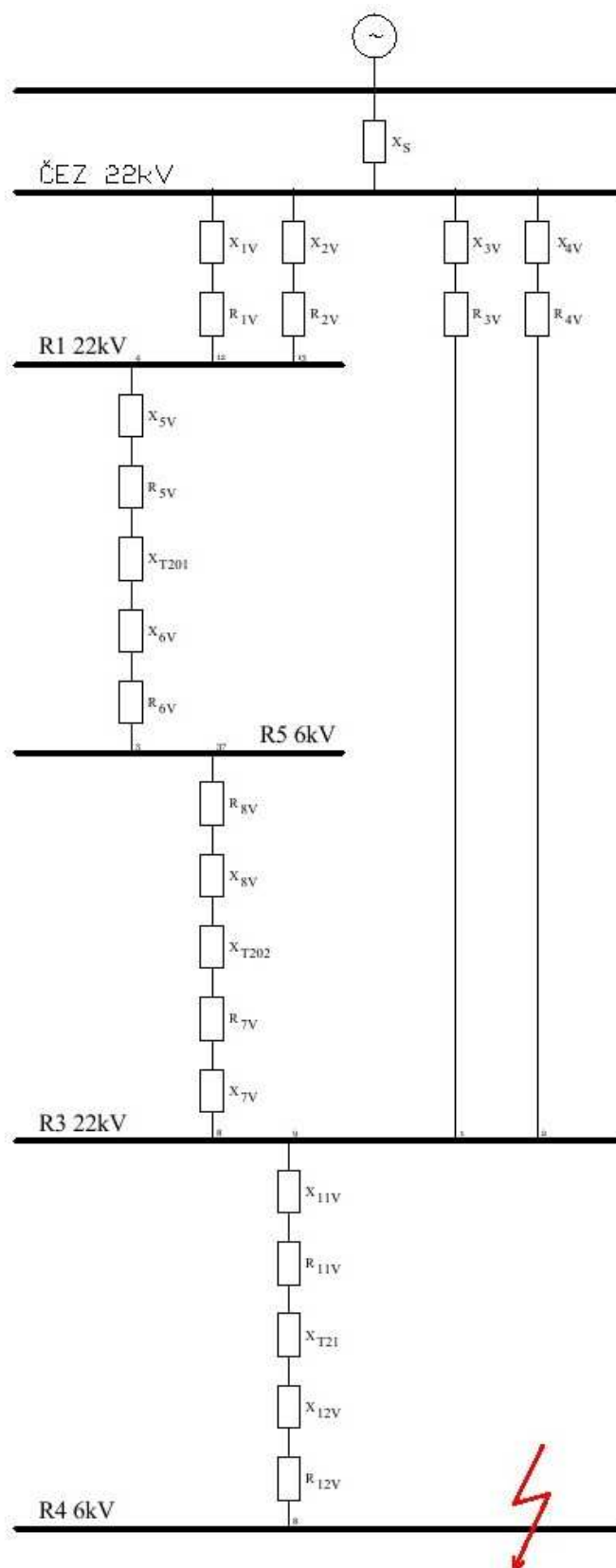


obr. 23 Náhradní schéma zkratového obvodu R5 6 kV

Po obdobném výpočtu jsem se dopracoval k hodnotě zkratového výkonu $S_k = 182,34 \text{ MVA}$.

6.4. Výpočet v rozvodně R4 6kV

6.4.1. Náhradní schéma

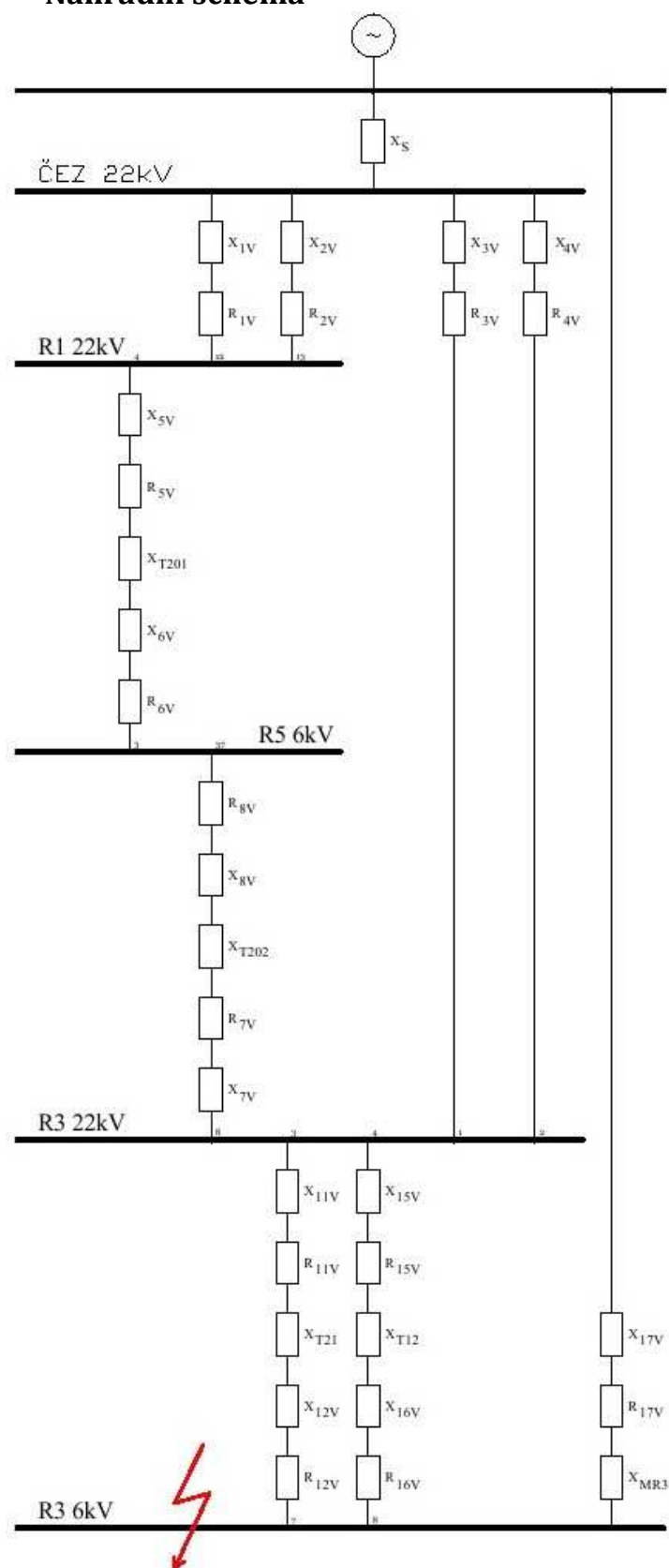


obr. 24 Náhradní schéma zkratového obvodu R4 6 kV

Po obdobném výpočtu jsem se dopracoval k hodnotě zkratového výkonu $S_k = 72,23 \text{ MVA}$.

6.5. Výpočet v rozvodně R3 6kV

6.5.1. Náhradní schéma

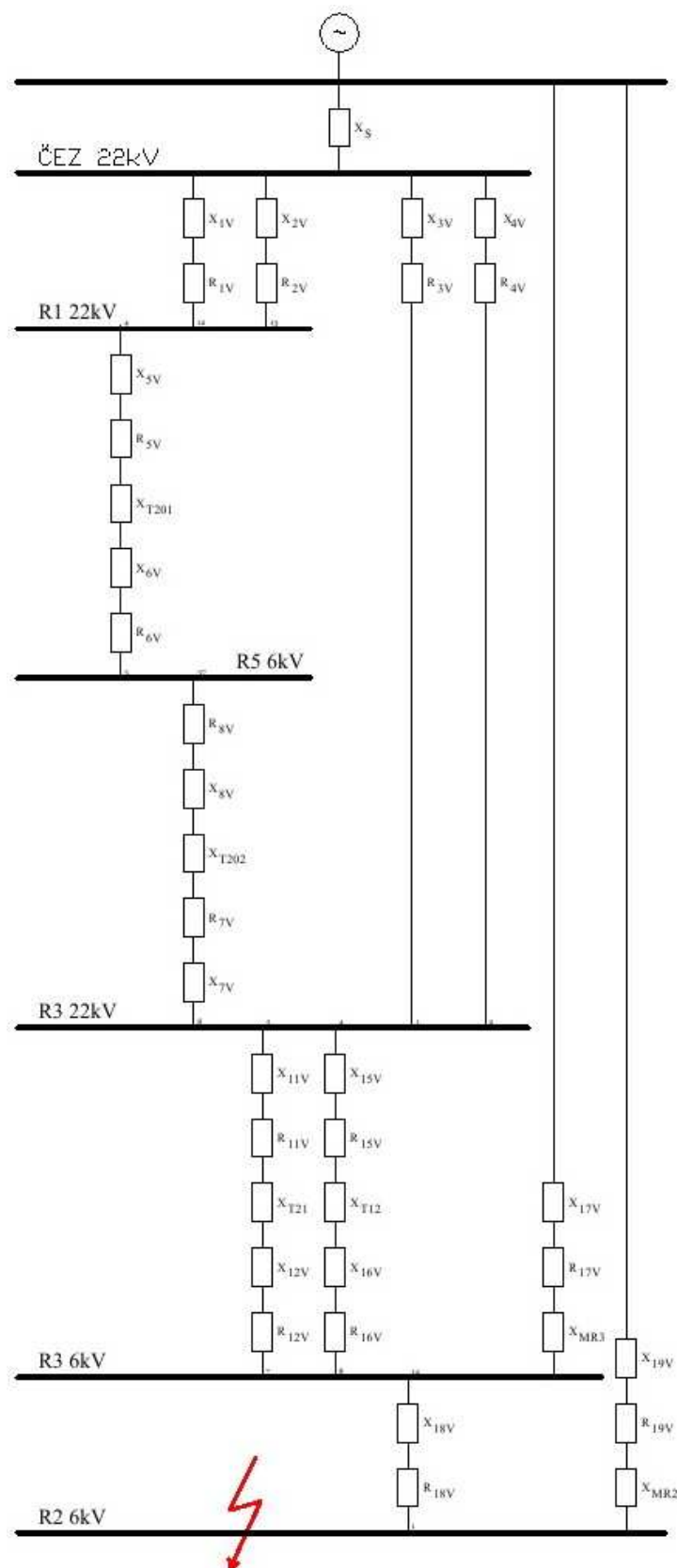


obr. 25 Náhradní schéma zkratového obvodu R3 6 kV

Po obdobném výpočtu jsem se dopracoval k hodnotě zkratového výkonu $S_k = 135,08 \text{ MVA}$.

6.6. Výpočet v rozvodně R2 6kV

6.6.1. Náhradní schéma



obr. 26 Náhradní schéma zkratového obvodu R2 6 kV

Po obdobném výpočtu jsem se dopracoval k hodnotě zkratového výkonu $S_k = 139,99 \text{ MVA}$.

6.7. Porovnání zkratových výkonů

V následující tabulce je uvedeno porovnání vypočtených hodnot zkratových výkonů a dovolených jmenovitých výkonů v jednotlivých rozvodnách.

Rozvodna	Jmenovitý výkon	
	S_{kn} [MVA]	
	dovolený	vypočítaný
R1 22 kV	400	292,2
R3 22 kV	400	290,64
R2 6 kV	200	139,99
R3 6 kV	200	135,08
R4 6 kV	350	72,23
R5 6 kV	350	182,34

tab. 4 Porovnání hodnot jmenovitých výkonů

Z porovnání lze vyčíst, že zkratová odolnost rozvodu je vyhovující a není nutné navrhovat žádné změny.

7. Závěr

V úvodu této bakalářské práce jsou uvedeny teoretické poznatky k jednotlivým druhům zkratových poruch v elektrizační soustavě. Pro výpočet zkratových proudů je nutné určit souměrné složky impedancí pro konkrétní druh zkratu. Podstatou metody souměrných složek je rozklad obvodu až na tři samostatné soustavy (sousednou, zpětnou a netočivou).

V další části pak byly teoreticky popsány zásady pro výpočet zkratových proudů v trojfázových soustavách dle platné normy ČSN EN 60909. Při dodržení těchto zásad se lze dopočítat výsledků přijatelné přesnosti. Rozhodující vliv na přesnost výpočtů zkratových proudů má samozřejmě také určení správných parametrů prvků elektrizační soustavy. Tyto parametry prvků jsou uvedeny hned v další části práce.

Zkratové proudy počítáme především pro dimenzování elektrických zařízení. Ty je nutné volit, popř. dimenzovat tak, aby účinkům proudů při zkratech bezpečně odolávala. Jejich zkratová odolnost je charakterizována dynamickými a tepelnými účinky zkratového proudu. Dynamickými účinky se rozumí, jaký proudový náraz při zkratu zařízení bez poškození snese. Tepelnými účinky pak, jakým proudem je možné zařízení po určitou dobu zatížit, aniž by došlo k jeho poškození nadměrným oteplením. U vypínačů a pojistek je rozhodující vypínací proud udávající maximální hodnotu zkratového proudu, který vypínač bezpečně vypne. Zajímá nás proto nejnepríznivější případ, který může nastat a tím je zpravidla trojfázový symetrický zkrat, při kterém vzniká největší zkratový proud.

V praktické části jsou pak uvedeny výpočty zkratových poměrů v jednotlivých rozvodnách dle zadání. Z výsledků výpočtů zkratových poměrů je zřejmé, že zkratová odolnost rozvodu je plně dostačující. U rozvodu R4 6 kV je výsledný vypočítaný zkratový výkon S_k menší z důvodu rozpojení přípojky mezi touto rozvodnou a rozvodnou R3 6 kV.

Při zpracování bakalářské práce jsem měl možnost využít znalostí, které jsem během studia na škole VŠB-TU Ostrava v oboru elektroenergetika získal a zároveň jsem si své znalosti prohloubit studiem literatury zabývající se touto problematikou.

Seznam literatury

- [1] ČSN EN 60909-0.: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002
- [2] Hradílek, Z.: Elektroenergetika II., Skriptum VŠB Ostrava, 1993.
- [3] gur10@PCA447B, *Zkraty%20-%20opora.pdf* [online], datum vytvoření 15.3. 2006 [cit. 2006-03-15], <http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/Zkraty%20-%20opora.pdf>
- [4] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL, Praha 1987.
- [5] ElektriKa.cz, spol. s r.o., *ElektriKa.cz, portál o silnoproudé elektrotechnice, elektroinstalace, vyhlášky, schémata zapojení* [online]. [cit. 2011-04-10], <<http://elektriKa.cz/>>